

# PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 2001-311613

(43)Date of publication of application : 09.11.2001

(51)Int.Cl.

G01B 11/24  
G01B 11/16

(21)Application number : 2000-293085

(71)Applicant : TOYOOKA SATORU  
FUJI PHOTO OPTICAL CO LTD

(22)Date of filing : 26.09.2000

(72)Inventor : TOYOOKA SATORU  
LINI WIDIASTUTI

(30)Priority

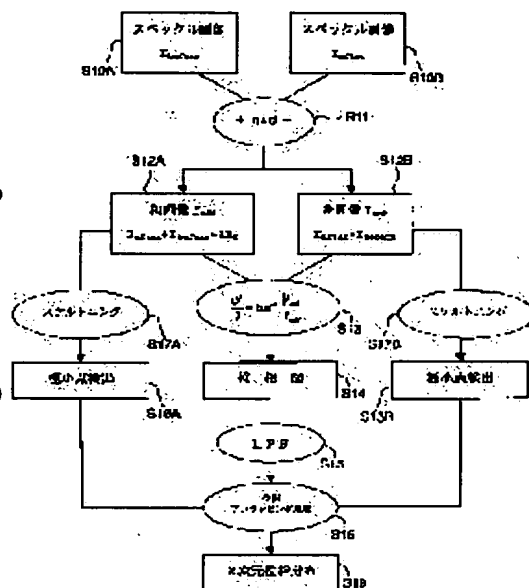
Priority number : 2000048271 Priority date : 24.02.2000 Priority country : JP

## (54) PHASE UNLAPPING METHOD IN IMAGE ANALYSIS OF SPECKLE INTERFERENCE

(57)Abstract:

**PROBLEM TO BE SOLVED:** To achieve a highly accurate unlapping processing to obtain a phase distribution corresponding to the deformation of an object by eliminating effect of speckle noises by finding the inversion position related to lapping from the minimal point of a strength difference  $I_{sub}$  and the minimal point of a strength sum  $I_{add}$ , in a phase analysis curve of a dynamic body to be observed subjected to lapping in a phase unlapping method in the image analysis of speckle interference for finding phase information of the body to be observed by an addition/ subtraction method.

**SOLUTION:** With respect to a phase curve  $\phi$ , lapped, crimp point positions A, C and E are found out from the minimal value of a strength subtraction  $I_{sub}$  curve (thin solid line), and crimp point positions B and D from the minimal value of a strength addition  $I_{add}$  curve (broken line) separately. Therefore, a phase unlapping processing is carried out to obtain an intrinsic phase curve defining a phase value  $\phi$  as respective phase values  $\phi$  in the first region of positions A-B, a phase value  $2p-\phi$  in the second region of positions B-C, a phase value  $2p+\phi$  in the third region of position s C-D, and a phase value  $4p+\phi$  in the fourth region of positions D-E.



## LEGAL STATUS

[Date of request for examination]

[Date of sending the examiner's decision of rejection]

[Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number]

[Date of registration]

[Number of appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of requesting appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of extinction of right]

Copyright (C); 1998,2003 Japan Patent Office

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開2001-311613

(P2001-311613A)

(43) 公開日 平成13年11月9日 (2001.11.9)

(51) Int.Cl.<sup>7</sup>

G 0 1 B 11/24

11/16

識別記号

F I

G 0 1 B 11/16

11/24

テーマト\* (参考)

2 F 0 6 5

D

審査請求 未請求 請求項の数 7 O L (全 13 頁)

(21) 出願番号 特願2000-293085 (P2000-293085)

(22) 出願日 平成12年9月26日 (2000.9.26)

(31) 優先権主張番号 特願2000-48271 (P2000-48271)

(32) 優先日 平成12年2月24日 (2000.2.24)

(33) 優先権主張国 日本 (J P)

特許法第30条第1項適用申請有り 2000年3月28日

(社) 応用物理学会発行の「2000年 (平成12年) 春季

第47回応用物理学関係連合講演会 講演予稿集 No.

3」に発表

(71) 出願人 591079225

豊岡 了

埼玉県浦和市大久保領家597-2

(71) 出願人 000005430

富士写真光機株式会社

埼玉県さいたま市植竹町1丁目324番地

(72) 発明者 豊岡 了

埼玉県浦和市大久保領家597-2

(72) 発明者 リニ ウィディアストゥティ

埼玉県浦和市大久保195-1

(74) 代理人 100097984

弁理士 川野 宏

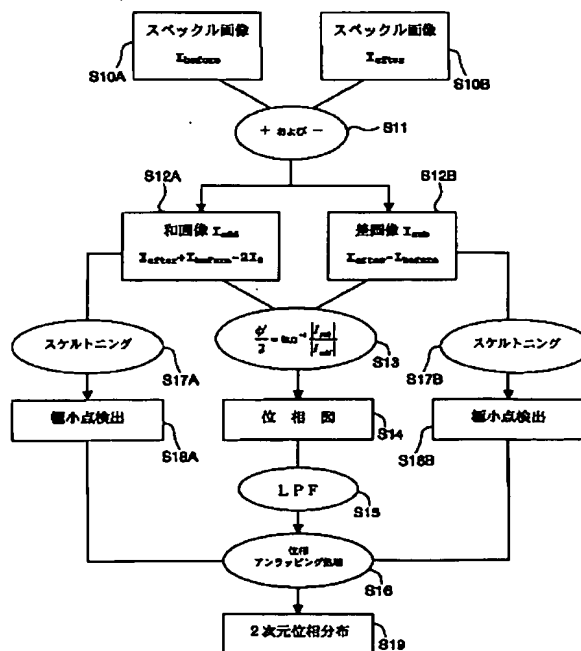
最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 スペックル干渉の画像解析における位相アンラッピング方法

(57) 【要約】

【目的】 動的被観察体の位相情報を和差法により求めるスペックル干渉の画像解析における位相アンラッピング方法において、ラッピングされた被観察体の位相分布曲線における、ラッピングに係る反転位置を、強度差  $I_{sub}$  の極小点および強度和  $I_{add}$  の極小点から求めることにより、スペックルノイズの影響を排除して、高精度にアンラッピング処理を行う。

【構成】 ラッピングされた位相曲線  $\phi'$  に対しては、強度差  $I_{sub}$  曲線 (細い実線) の極小値から折れ曲がり点位置 A、C、E が、強度差  $I_{add}$  曲線 (破線) の極小値から折れ曲がり点位置 B、D がそれぞれ見つけられるので、位置 A-B の第1領域については位相値  $\phi'$  を、位置 B-C の第2領域については位相値  $2\pi - \phi'$  を、位置 C-D の第3領域については位相値  $2\pi + \phi'$  を、位置 D-E の第4領域については位相値  $4\pi - \phi'$  を、各々位相値  $\phi$  として位相アンラッピング処理を行い、本来の位相曲線  $\phi$  を得る。



## 【特許請求の範囲】

【請求項1】 スペックル干渉法を用いて得られた、動的被観察体の位相情報を担持したスペックルパターン画像を解析して求めた、所定位相範囲に位相ラッピングされた被観察体の位相 $\phi$ の分布曲線を、位相アンラッピングする方法であって、

前記被観察体の動きの前後における2つのスペックルパターン画像の強度 $I_{before}$ 、 $I_{after}$ についての強度差を $I_{sub}$ 、強度和を $I_{add}$ としたとき、これら強度差 $I_{sub}$ および強度和 $I_{add}$ に基づいて前記被観察体の位相 $\phi$ の分布曲線を求める方法において、

前記位相ラッピングされた被観察体の位相 $\phi$ の分布曲線における、ラッピングに係る反転位置を、前記強度差 $I_{sub}$ の極小点および前記強度和 $I_{add}$ の極小点から求めることを特徴とするスペックル干渉の画像解析における位相アンラッピング方法。

【請求項2】 前記強度差 $I_{sub}$ の極小点に基づき、前記位相 $\phi$ の分布曲線における、負の傾きから正の傾きに移行する反転位置を求め、前記強度和 $I_{add}$ の極小点に基づき、位相 $\phi$ の分布曲線における、正の傾きから負の傾きに移行する反転位置を求めることを特徴とする請求項1記載のスペックル干渉の画像解析における位相アンラッピング方法。

【請求項3】 前記位相ラッピングされた被観察体の位相 $\phi$ が下式により求められることを特徴とする請求項1または2記載のスペックル干渉の画像解析における位相アンラッピング方法。

【数1】

$$\frac{\phi}{2} = \tan^{-1} \left| \frac{I_{sub}}{I_{add}} \right|$$

ただし、 $\phi$ はラッピングされた被観察体の位相値である。

【請求項4】 前記所定位相範囲が0から $\pi$ であることを特徴とする請求項3記載のスペックル干渉の画像解析における位相アンラッピング方法。

【請求項5】 前記位相アンラッピング処理が、奇数の第 $n$ 領域(ラッピング位相増加領域)については $\phi = (n$

$$I_i(x, y) = I_0[1 + \gamma \cos\{\phi(x, y) + 2\pi i/N\}]$$

ここで、 $\phi(x, y)$ は求めようとする位相である。また、 $I_0$ は平均強度、 $\gamma$ は干渉縞の可視度(モジュレーション)であり、いずれも未知量である。 $\phi(x, y)$ を解析的に求めるためには、 $N=3$ であればよい。 $N>3$ では、未知数の数より方程式の数が増えるが、 $I_0$ と $\gamma$ は一般にゆらぎをとともなう量であると考えられるので、 $\phi(x, y)$ の最小二乗法的な意味において最適値が求められる。簡単な例として、 $N=4$ の場合は、

【0004】

$-1) \pi + \phi$ により、偶数の第 $n$ 領域(ラッピング位相減少領域)については $\phi = n\pi - \phi$ により、各々なされることを特徴とする請求項4記載のスペックル干渉の画像解析における位相アンラッピング方法。ただし、 $\phi$ はアンラッピングされた被観察体の位相値であり、第1領域は位相値0から始まる。

【請求項6】 前記位相アンラッピング処理の前に、前記強度差 $I_{sub}$ および前記強度和 $I_{add}$ のデータに対して、前記位相 $\phi$ により得られた各位相領域毎にローパスフィルタによる平滑化処理を施すことを特徴とする請求項1から5のうちのいずれか1項記載のスペックル干渉の画像解析における位相アンラッピング方法。

【請求項7】 前記動的観察体が引っ張り試験に供された試験片であることを特徴とする請求項1から6のうちのいずれか1項記載のスペックル干渉の画像解析における位相アンラッピング方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、スペックル干渉画像解析における位相アンラッピング方法に関し、詳しくは、動的物体の時間的変形に対するスペックル干渉画像を解析することにより得られた位相分布において、所定位相内にラッピングされた位相分布を連続的に接続するスペックル干渉の画像解析における位相アンラッピング方法に関するものである。

【0002】

【従来の技術】被検体の表面形状を測定するために、位相分布(表面形状分布)を簡単に求めたいという要求は、近年の技術の高度化に伴い光学分野や電子分野を中心に非常に強いものとなっている。特に、干渉測定において、このような被検体の位相分布を求める手法については、位相シフト法とフーリエ変換法を用いたものが従来より一般に知られている。位相シフト法(縞走査法とも称される)とは、干渉計の物体光と参照光の間に、一般には $2\pi$ を整数分の一に分割した位相角だけ位相差を与えるもので、 $2\pi$ を $N$ 等分した $N$ 枚の干渉縞画像は下記(1)式で与えられる。

【0003】

【数2】

$$i = 0, 1, \dots, (N-1) \quad \dots\dots\dots (1)$$

【数3】

$$\phi(x, y) = -\tan^{-1} \left( \frac{-I_2 + I_4}{I_1 - I_3} \right) \quad \dots\dots\dots (2)$$

より求められる。次に、フーリエ変換法について説明する。干渉計の一方の光路を $y$ 軸周りに微小角 $\theta$ だけ傾けると、下記(3)式で与えられる強度分布が得られる。

【0005】

【数4】

$$I(x, y) = I_0[1 + \gamma \cos\{\phi(x, y) + 2\pi x \sin\theta/\lambda\}] \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$= I_0[1 + \gamma \cos\{\phi(x, y) + 2\pi f_0 x\}]$$

ここで、 $f_0 = \sin\theta/\lambda$ は、光路を傾けたことによって  
生じたキャリア縞の空間周波数である。上記(3)式を  
x方向にフーリエ変換すると、下記(4)式が求まる。

$$J(f, y) = \int_{-\infty}^{\infty} I(x, y) \exp(-j2\pi fx) dx \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$= J_0(f, y) + J_1(f + f_0, y) + J_1^*(f - f_0, y)$$

この(4)式の右辺は、 $f_0$ が十分大きければ空間周波  
数軸上で3つの項が分離することを示している。こ  
こで、右辺の第2項のみを取り出し、他の項をカットする  
フィルタに通すと、下記(5)式が得られる。

【0007】

【数6】

$$I_r = I_0 \gamma \exp[i\phi(x, y)] \quad \dots\dots\dots (5)$$

この(5)式の右辺の実部と虚部の比から、下記(6)  
式が求められる。

【0008】

【数7】

$$\phi(x, y) = \tan^{-1} \frac{\text{Im}[I_r]}{\text{Re}[I_r]} \quad \dots\dots\dots (6)$$

上述した従来の2方法は、いずれも、求めようとする未  
知量 $\phi(x, y)$ が他の未知量 $I_0$ 、 $\gamma$ とは無関係に求めら  
れる。位相値は $[-\pi, \pi]$ の間の主値として求められ  
る。位相シフト法の場合について、線形的に位相が変化  
する場合のデータの現われ方を図5に示す。上記(6)  
式の分母が余弦関数、分子が正弦関数であり、その比と  
して、 $2\pi$ ごとに位相跳びが生じる鋸波状の分布が得ら  
れる。位相跳びの位置を判定し、隣り合うデータ間に $2\pi$   
の位相値を加える(または差し引く)ことによって位  
相跳びを補正し、物体の変形に比例した位相分布を得る  
ことができる。この処理を位相アンラッピングと称す  
る。

【0009】一般に、位相シフト法は2次元干渉縞の1  
点の位相をその点の位相シフトした複数のデータから解  
析できる。したがって、空間的に別の点の影響を受ける  
ことはない。それに対して、フーリエ変換法において空  
間キャリアからなる1直線上のデータ全てに亘ってフー  
リエ変換の演算を施さなければならないので、各点の位  
相を他の点と独立に求めることはできない。

【0010】位相シフト法は複数枚の位相シフトした干  
渉縞を撮る間、観察物体は静止していなければならない。  
それに対して、フーリエ変換法においては、キャリ  
ア縞さえ作っておけば1枚の干渉縞から位相解析ができ  
るので、動的な現象に適しているといえる。換言すれ  
ば、位相シフト法は対象物に対して空間的な制限は緩い

が時間的には定常であることが必須であり、フーリエ変  
換法においては対象物は空間的には一様である必要があ  
るが、時間的には動いていてもかまわないといえる。

【0011】しかしながら、対象物が時間的に変化し、  
かつ空間的にも一様でない場合にはこれらの方法を適用  
することはできない。例えば、材料の塑性変形から破壊  
に至る過程は非線形的で、その歪測定においては、時間  
的かつ空間的な変形分布を測定する必要があるが、この  
ような測定において上記2つの方法を適用することはで  
きない。このような時間的、かつ空間的な変動がある場  
合に有効な干渉法として、動的スベックル干渉法が知ら  
れている。

【0012】スベックル干渉法は、粗面物体をレーザ光  
で照射したときに観察面に生じる斑点状の模様—スベッ  
クルパターン—を利用する干渉法である。スベックルパ  
ターンは一般の結像系では画像ノイズとして好ましくな  
いものとされる。しかし、これを物体に張り付いた自然  
の目印と考えると、その動きから変形を見積もることが  
できる。また、スベックル干渉法では光の波長を基準と  
した高精度な変形測定が可能になる。

【0013】図6に、2光束照射型のスベックル干渉装  
置を示す。被観察体である粗面物体100は、x-z面内  
で対称な、レーザ光源101からの2光束102A、102B  
によって照明される。被観察体100によって拡  
散反射した光束はCCDカメラ103の結像面上に干渉  
スベックルパターンを形成する。この後、得られた干渉  
スベックルパターン画像を解析して、被観察体100の  
表面形状に応じた位相解析を行うこととなるが、図6の  
装置においては、和差法を用いた位相解析を行っている。

【0014】一般に、スベックルパターン画像の位相解  
析においては、被観察体100の変形前後のスベックル  
パターンを撮像し、それらのピクセルごとの強度の差を  
計算する。相関の強い場所、すなわち変形による位相変  
化が0または $2\pi$ の整数倍の位置では差強度が0に近く  
なり、一方、相関の弱い場所では差強度が大きな値をと  
ることから、2画像の強度差 $I_{a, u b}$ の絶対値を計算す  
ることによって、変形量に応じた相関縞が得られる。

【0015】これに対し和差法においては、強度差 $I_{a, u b}$   
の情報に加えて強度和 $I_{a, d d}$ の情報を利用する

ことによって、可視度（モデュレーション） $\gamma$ とは無関係に位相を求める。

【0016】ここで、図6に示すように、2つの光束102A、102Bの各光路上にそれぞれシャッタ104A、104Bを置き、一方の光束のみで物体を照射したときの強度分布 $I_1$ 、 $I_2$ をあらかじめ測定しておく。変形前後のスペックルパターン強度 $I_{before}$ 、 $I_{after}$ は各々下記（7）式で表される。

【0017】

【数8】

$$\begin{aligned} I_{sub} &= I_{after} - I_{before} = 2I_0\gamma \sin(\theta + \frac{\phi'}{2})\sin(\frac{\phi'}{2}) \\ I_{add} &= I_{after} + I_{before} = 2I_0 = 2I_0\gamma \cos(\theta + \frac{\phi'}{2})\cos(\frac{\phi'}{2}) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (8)$$

これらの式に基づき下記（9）式により位相 $\phi'$ （x,y）が求められる。

【0019】上式（9）においては、分母、分子の各々に絶対値が付されており、このことが本発明において重要な意味をもつことになる。すなわち、和差法では、求めようとする位相が、 $I_{sub}/I_{add}$ の絶対値の逆正接により導出されるため、求められた位相曲線 $\phi'$ は、図3に示す如き三角波状の関数となる。これに対し、上述したような絶対値を有していない（2）式を用いた場合、位相分布において、図5に示すような $2\pi$ 毎に跳びが生じるものとなる。

【0020】このようにして位相曲線の折れ曲がり点を見つけることができたので、この後隣接する折れ曲がり点の間の各領域毎に、所定の位相アンラッピング処理を施すこととなる。

【0021】

【数10】

$$\frac{\phi'}{2} = \tan^{-1} \left| \frac{I_{sub}}{I_{add}} \right| \quad \dots\dots\dots (9)$$

このようにして、位相 $\phi'$ （x,y）が強度 $I_0$ や可視度（モデュレーション） $\gamma$ と独立に計算によって求められることになるが、ここでの問題は、本来の位相値が $\pi$ 以上となる場合であっても、得られる位相値は0と $\pi$ の間の値になってしまうため、位相値が0および $\pi$ の整数倍となる位置で折り返された状態になってしまうことである。

【0022】そこで、このような位相ラッピングされた（折り畳まれた）位相曲線に対して、これを本来の曲線に戻す位相アンラッピング処理が必要となる。

【0023】

【発明が解決しようとする課題】しかしながら、和差法を用いて得られた位相像の中から、このような折れ曲がり点の位置を見つけ出すことは、図5における跳び点を検出する場合に比べると大きな困難を伴う。特にスペッ

$$I_{before} = I_0[1 + \gamma \cos \theta] \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$I_{after} = I_0[1 + \gamma \cos(\theta + \phi')]$$

ただし、 $I_0 = I_1 + I_2$ である。ここで、 $\theta$ はスペックルのランダムな位相、 $\phi'$ は物体の変形によって変化した位相であるとする。このとき、強度差 $I_{sub}$ と強度和 $I_{add}$ は下記（8）式のように計算される。

【0018】

【数9】

クル解析画像においては、折り畳まれた位相曲線はスペックルノイズに埋もれている。このことを、以下のようにして得られたデータを用いて説明する。

【0024】ここでは、物体を変形させる代りに粗面を剛体回転させ、これを計測する場合について説明する。図7に示すように、粗面平板201を水平軸（z軸）周りに回転できるようにして、平板201の右下端をPZT202を用いて変位させる。これにより、正確な回転量が予測可能となる。平板201の回転操作の前後におけるスペックルパターン画像の強度差 $I_{sub}$ と強度和 $I_{add}$ を上記（8）式を用いて計算し、上記（9）式から位相 $\phi'$ を計算した。その結果を図8に示す。図8

（A）から強度差 $I_{sub}$ による差画像と強度和 $I_{add}$ による和画像は位相が $\pi$ だけずれているのが分かる。図8（B）に示す位相像は差画像と類似しているように見えるが、実際にはその位相分布は正弦波状ではなく、三角波状となっているはずである。これは、位相分布がスペックルノイズに埋もれているので、差画像と良く似た分布に見えてしまうことによるものである。

【0025】図8（C）、（D）は、上記各画像における、縦方向の同一直線上のこれらの分布をグラフによって示したものである。図8（C）において細線が強度差（Sub）、太線が強度和（Add）、図8（D）における実線がラッピングされた位相の分布曲線を示すものである。このように、本来三角波状の分布となるべき位相分布はスペックルノイズに邪魔されてしまい、山と谷のピーク位置を検出することは困難である。

【0026】本発明は上記事情に鑑みなされたもので、和差法を用い、スペックル干渉により得られた動的被観察体画像の位相解析を行う場合に、スペックルノイズの影響を受けることなく、高精度に位相曲線のアンラッピング処理を行うことができるスペックル干渉の画像解析における位相アンラッピング方法を提供することを目的とするものである。

【0027】

【課題を解決するための手段】本発明のスペックル干渉画像解析における位相アンラッピング方法は、スペックル干渉法を用いて得られた、動的被観察体の位相情報を担持したスペックルパターン画像を解析して求めた、所定位相範囲に位相ラッピングされた被観察体の位相 $\phi'$ の分布曲線を、位相アンラッピングする方法であって、前記被観察体の動きの前後における2つのスペックルパターン画像の強度 $I_{before}$ 、 $I_{after}$ についての強度差を $I_{sub}$ 、強度和を $I_{add}$ としたとき、これら強度差 $I_{sub}$ および強度和 $I_{add}$ に基づいて前記被観察体の位相 $\phi'$ の分布曲線を求める和差法を用いる方法において、前記位相ラッピングされた被観察体の位相 $\phi'$ の分布曲線における、ラッピングに係る反転位置を、前記強度差 $I_{sub}$ の極小点および前記強度和 $I_{add}$ の極小点から求めることを特徴とするものである。

【0028】ここで、上記「強度和 $I_{add}$ 」とは、単純に、 $I_{before}$ と $I_{after}$ を加算したものではなく、この加算値から所定のバイアス値を差し引いたものである。また、前記強度差 $I_{sub}$ の極小点に基づき、前記位相 $\phi'$ の分布曲線における、負の傾きから正の傾きに移行する反転位置を求め、前記強度和 $I_{add}$ の極小点に基づき、位相 $\phi'$ の分布曲線における、正の傾きから負の傾きに移行する反転位置を求めることを特徴とするものである。また、前記位相ラッピングされた被観察体の位相 $\phi'$ が下式により求められることを特徴とするものである。

【0029】

【数11】

$$\frac{\phi'}{2} = \tan^{-1} \left| \frac{I_{sub}}{I_{add}} \right|$$

ただし、 $\phi'$ はラッピングされた被観察体の位相値である。また、前記所定範囲が0から $\pi$ であることを特徴とするものである。さらに、前記位相アンラッピング処理が、奇数の第 $n$ 領域（ラッピング位相増加領域）については $\phi = (n-1)\pi + \phi'$ により、偶数の第 $n$ 領域（ラッピング位相減少領域）については $\phi = n\pi - \phi'$ により、各々なされることを特徴とするものである。ただし、 $\phi$ はアンラッピングされた被観察体の位相値であり、第1領域は位相値0から始まる。

$$\begin{aligned} I_{sub} &= I_{after} - I_{before} = 2I_0\gamma \sin\left(\theta + \frac{\phi'}{2}\right) \sin\left(\frac{\phi'}{2}\right) \\ I_{add} &= I_{after} + I_{before} = 2I_0\gamma \cos\left(\theta + \frac{\phi'}{2}\right) \cos\left(\frac{\phi'}{2}\right) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (11)$$

なお、上式(11)から明らかなように、上記強度和 $I_{add}$ は、単純に、 $I_{before}$ と $I_{after}$ を加算したものではなく、この加算値から $2I_0$ （ただし、 $I_0 = I_1 + I_2$ ）を差し引いたものである。

【0030】また、前記位相アンラッピング処理の前、前記強度差 $I_{sub}$ および前記強度和 $I_{add}$ のデータに対して、前記位相 $\phi'$ により得られた各位相領域毎にローパスフィルタによる平滑化処理を施すことを特徴とするものである。さらに、前記動的観察体が引っ張り試験に供された試験片であることを特徴とするものである。

【0031】

【発明の実施の形態】以下、本発明の一実施形態に係るスペックル干渉画像解析における位相アンラッピング方法について図面を参照しつつ説明する。なお、本実施形態においては、説明の便宜のため、前述した図6、7を用いて得られたデータを位相アンラッピングする場合について説明する。

【0032】図1は本発明の実施形態に係る方法を説明するための概念的フローチャートを示すものである。まず、前処理として、スペックル干渉法を用い、被観察体の変形前後におけるスペックルパターン画像の強度 $I_{before}$ 、 $I_{after}$ を求める（S10A、S10B）。求められた変形前後のスペックルパターン画像の強度分布 $I_{before}$ 、 $I_{after}$ は各々下記(10)式で表される。

【0033】

【数12】

$$\begin{aligned} I_{before} &= I_0[1 + \gamma \cos\theta] \\ I_{after} &= I_0[1 + \gamma \cos(\theta + \phi')] \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (10)$$

ただし、 $I_0 = I_1 + I_2$ である。 $I_1$ 、 $I_2$ は図6に示す装置において、一方の光束102A、102Bのみで物体を照射したときの各強度分布を示すものである。ここで、 $\theta$ はスペックルのランダムな位相、 $\phi'$ は物体の変形によって変化した位相である。

【0034】次に、上述したようにして求められた、2つのスペックルパターン画像の強度分布

$I_{before}$ 、 $I_{after}$ に対して和算および差算の演算処理を施し（S11）、強度差 $I_{sub}$ と強度和 $I_{add}$ を求める（S12A、S12B）。強度差 $I_{sub}$ と強度和 $I_{add}$ は下記(11)式により表される。

【0035】

【数13】

【0036】これらの式を演算して求めた下記(12)式により位相 $\phi'$ (x,y)が求められる（S13）。

【0037】

【数14】

$$\frac{\phi}{2} = \tan^{-1} \frac{|I_{\text{sub}}|}{|I_{\text{odd}}|} \dots\dots\dots (12)$$

このようにして、位相 $\phi^-(x,y)$ が強度 $I_0$ や可視度（モジュレーション） $\gamma$ と独立した計算によって求められることになる。

【0038】このように、和差法を用いて求められた位相曲線（S14）は、前述した図8（D）に示すように、位相値が0および $\pi$ の整数倍となる位置で折り返された状態となっている。すなわち、ラッピングされた（折り畳まれた）状態となっている。

【0039】このようなラッピングされた（折り畳まれた）位相曲線に対して、これを本来の曲線に戻す位相アンラッピング処理が施されることになるが、図示するように、この曲線そのままでは三角波状の分布となるべき本来の位相分布はスペckルノイズに邪魔されてしまい、山と谷のピーク位置を検出することは困難である。

【0040】そこで、位相像に対して適当なローパスフィルタをかけ、スペckルノイズを平滑化する（S15）。図9（A）はこのような平滑処理がなされた位相像を示すものである。これと並行して、上記強度差 $I_{\text{sub}}$ および強度和 $I_{\text{add}}$ を各々表す曲線に対して、適当なレベルの閾値を設けて閾値以下の領域を極小点周りに幅をもたせた領域とし、次にこの領域にスケルトニング処理（細線化処理）を施し（S17A、S17B）、位相折り返し点である極小点を求める（S18A、S18B）。図2（A）は差画像を表すものであり、図2（B）はこのようにして求められた差画像の極小線を表すものである。このように構成された本実施形態方法では、スペckルノイズに邪魔されていた位相曲線の折れ曲がり点を容易に見つけることができる。

【0041】このように極小点を容易に見つけ出すことができるのは、図3に示すように、強度差 $I_{\text{sub}}$ および強度和 $I_{\text{add}}$ を各々表す曲線が、各極小点において折返し形状となっており、スペckルノイズが大きくてもこの折返し形状は判別が容易だからである。

【0042】例えば、図3に示すようにラッピングされた位相曲線（-o-o-線）に対しては、強度差 $I_{\text{sub}}$ 曲線（細い実線）の極小値から折れ曲がり点位置A、C、E……が、強度和 $I_{\text{add}}$ 曲線（破線）の極小値から折れ曲がり点位置B、D……がそれぞれ見つけられるので、位置A-Bの第1領域については位相値 $\phi^-$ をそのまま位相値 $\phi$ とし、位置B-Cの第2領域については位相値 $2\pi-\phi^-$ を位相値 $\phi$ とし、位置C-Dの第3領域については位相値 $2\pi+\phi^-$ を位相値 $\phi$ とし、位置D-Eの第4領域については位相値 $4\pi-\phi^-$ を位相値 $\phi$ とし、……というようにして位相アンラッピング処理を行い（S16）、アンラッピングされた本来の位相曲線 $\phi$ を得る。なお、この位相アンラッピング処理を一般式で表すと、奇数の第n領域（ラッピング位相増加領域）に

ついては $\phi = (n-1)\pi + \phi^-$ であり、偶数の第n領域（ラッピング位相減少領域）については $\phi = n\pi - \phi^-$ となる。

【0043】なお、図9（B）は、位相アンラッピング処理がなされた位相像を表すものである。

【0044】最後に、上記で得られた位相アンラッピング処理がなされた位相曲線 $\phi$ を2次元的に拡張し、図4に示す如き変形分布を得る（S19）。なお、本発明の実施形態方法においては種々の態様の変更が可能であり、例えば、上述したローパスフィルタによる平滑化処理や、スケルトニング処理（細線化処理）は、上記強度差 $I_{\text{sub}}$ および強度和 $I_{\text{add}}$ を各々表すデータとともに、あるいはこれらのデータに替えて、位相ラッピングされた位相データに対して施すようにしてもよい。

【0045】例えば、図10（図1の実施形態と類似する処理については、図1に示す番号に10を加えた数字によって表わす）に示すように、位相データに対してスケルトニング処理を施した後に、位相差 $\pi$ の各領域ごとにナンバリング（順序付け）処理を行い、この情報に基づいて強度差 $I_{\text{sub}}$ と強度和 $I_{\text{add}}$ を表すデータの絶対値を一旦外し、この後にローパスフィルタによる平滑化処理を施すようにしてもよい。

【0046】すなわち、図3において、第1領域と第2領域の境界は強度和 $I_{\text{add}}$ の極小点から、第2領域と第3領域の境界は強度差 $I_{\text{sub}}$ の極小点から各々求めることができる。しかし、強度差 $I_{\text{sub}}$ と強度和 $I_{\text{add}}$ を表すデータは相当量のノイズを含んでいるため、両者の比の逆正接から求められる位相は境界部分で不連続になったり不自然なピークが現れたりすることがしばしば生じる。境界領域での不自然な分布を避けるために、強度差 $I_{\text{sub}}$ と強度和 $I_{\text{add}}$ を表すデータの絶対値を一旦外した後にローパスフィルタによる平滑化処理を施す方法が有効である。

【0047】この方法について、図11を参照しながら説明する。まず、前述したように、図10において、2枚のスペckル画像からそれらの強度差 $I_{\text{sub}}$ と強度和 $I_{\text{add}}$ のデータを得、かつ前述した（12）式を用いて位相データを得る処理ステップを経た後、上記位相データに対してはローパスフィルタによる平滑化処理（（S23A））を行なった後にスケルトニング処理（細線化処理）を施しておき、図3に示すように位相差 $\pi$ の各領域毎にナンバリング（順序付け）処理を行う。次に、符合を反転すべき領域を選ぶ。後述する引っ張り試験の場合は、位相変化が単調関数であるので、相関縮1周期ごとに符合が反転する。言い換えると、相隣る2領域毎に符合が反転する。図11（b）にその一例を示す。

【0048】このようにして得られたナンバリングデータに基づいて、図11（a）に示す強度差 $I_{\text{sub}}$ と強度和 $I_{\text{add}}$ のデータを分割し、図11（c）に示すよ



うに、負符号の領域の符号のみを符号反転したデータに対してフィルタリング処理を施す。これらフィルタリングされた強度差 $LPFI_{sub}$ と強度和 $LPFI_{add}$ のデータ(図11(d))に再度絶対値をかけることにより、図11(e)に示すように強度差 $LPFI_{sub}$ と強度和 $LPFI_{add}$ データに対して鮮明な極小点が

$$\frac{\phi'}{2} = \tan^{-1} \frac{|LPFI_{sub}|}{|LPFI_{add}|} \dots\dots\dots (13)$$

なお、上記図11(d)のデータを得た後、このデータに対して直接上記(13)式で表わす逆正接演算が施されるようにしてもよい。この後、上述のようにしてノイズの影響が取り除かれ、しかも $\pi$ 毎の領域の境界が確定されたデータに対して、前述した図1の実施形態と同様に所定のアルゴリズムにしたがい、容易に位相アンラッピング処理を行うことができ(S28)、被検体の表面形状に忠実な2次元位相分布 $\phi$ を得ることができる(S29)。

【0050】また、本明細書においては、本発明方法の適用対象として剛体回転させた粗面板を挙げて説明しているが、この適用対象は動的物体全般に及ぶものであり、例えば材料の引っ張り試験を行う際などにおいて特に有効である。以下、アルミニウム合金の引っ張り試験において刻々変化するその変形の解析処理に本発明方法を適用した場合について説明する。

【0051】一般に、アルミニウム合金等の材料を引っ張った場合、弾性変形領域では一様な伸びが生じる。これをスペックル干渉法(ESPI)で観察すると、図13(A)に示すような一様な縞が認識される。位置によって縞の方向や密度が異なるのは、変形以外に予期できない試験片の設置誤差等による回転が生じていることによるものである。変形が降伏点を越え、塑性変形領域になると、変形はすべり帯と称される、一般には引っ張り方向に略45°傾いた狭い領域に局在する。これをスペックル干渉法(ESPI)で観察すると、図13(B)に示すように、局在部に縞が密集して現れる。

【0052】さらに、変形速度に対して相対的に長い差分時間をもって観察すると、内部の縞構造が消失したような帯状の部分が現れ、時間的に略一定の速度で上下に移動していく様子が観察される。この部分について差分時間を十分に短くとると、縞構造が現れてくる。この部分を拡大して詳細に観察すると、図13(C)(最左図から最右図まで3.6秒毎に観察)に示すように、局在する変形が複雑に非線型的に伸展している様子がわかる。しかし、このような従来のスペックル干渉法(ESPI)では、変形の時間的変化を定性的に把握することは可能であるが、変形の大きさを定量的に求めることはできない。

【0053】これに対し、その変形の解析処理に本発明方法を適用すれば、上記変形の大きさを定量的に容易に

得られる。このように加工された強度差 $LPFI_{sub}$ と強度和 $LPFI_{add}$ に対して下記(13)式の逆正接演算が施され、図12に示す如きフィルタリング済みの位相ラッピングされた位相データが得られる。

【0049】

【数15】

把握することができる。すなわち、図14に示す如きアルミニウム合金の試験片を引張試験機に取り付け、1.6 $\mu$ m/sで緩やかに引っ張り、1.2秒毎に得られた干渉スペックル画像をコンピュータに取り込む。この後、図10に示す実施形態を用いて各干渉スペックル画像について2次元位相分布 $\phi$ を得、例えば、下記(14)式を用い各干渉スペックル画像について変形分布 $u$ を得る。なお、 $\alpha$ は測定光の試験片表面への入射角を示すものである。

【0054】

【数16】

$$u = \frac{\lambda}{4\pi \sin \alpha} \phi \dots\dots\dots (14)$$

図15(A)、(B)、(C)、(D)、図16(E)、(F)、(G)は、本実施形態方法を適用して得られた、変形分布 $u$ の定量解析データの抜粋を示すもので、図中の番号(NO. 1、10、26、30、43、49、50)は降伏状態に置ける変形の推移を時系列に沿って1.2秒毎に番号付けした際の番号を表すものである。

【0055】

【発明の効果】本発明の、スペックル干渉の画像解析における位相アンラッピング方法は、動的被観察体の変形前後の2つのスペックルパターン画像の強度 $I$

before、 $I_{after}$ の強度差を $I_{sub}$ 、強度和を $I_{add}$ とし、これら2つの強度 $I_{sub}$ 、 $I_{add}$ に基づいて被観察体の位相情報を求める和差法を用いる方法において、位相ラッピングされた被観察体の位相分布曲線における、ラッピングに係る反転位置を、強度差 $I_{sub}$ の極小点および強度和 $I_{add}$ の極小点から求めるようにしている。

【0056】強度差 $I_{sub}$ および強度和 $I_{add}$ は、和差法により位相分布曲線を演算するために既に求められているから、本発明方法においては位相ラッピングに係る反転位置を見つけるために、別途特別な演算などを行う必要がない。しかも、強度差 $I_{sub}$ および強度和 $I_{add}$ の極小点位置は折れ線の屈曲した状態となっており、極大点等の他の位置に比べて検出が極めて容易であるから、良好な位相アンラッピング処理を行うことができる。

【0057】また、物体の変形測定の場合に本発明方法

を適用すれば、位相 $\phi$ と変形量 $u$ の関係を予め特定しておくことにより、上記変形の大きさの定量的な把握を容易に行うことができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の実施形態を説明するためのフローチャート

【図2】図1に示す実施形態において、2(A)は差画像を、2(B)はスケルトニング処理による差画像の極小線を各々示す図

【図3】強度差、強度和、ラッピング位相値およびアンラッピング位相値の関係を示すグラフ

【図4】図1に示す実施形態を用いて得られた変形分布を示す斜視図

【図5】位相シフト法における位相ラッピング曲線を示すグラフ

【図6】2光束照射型のスペックル干渉装置を示す概略図

【図7】粗面を剛体回転させる際の装置を示す模式図

【図8】図7に示す装置を用い、得られたスペックル干渉画像から演算された差画像(A)、和画像(A)、位相像(B)およびこれらの強度分布(C)、(D)を示すグラフ

【図9】図1に示す実施形態において、9(A)は平滑化処理がなされた位相像を、9(B)はアンラッピング

処理がなされた位相像を各々示す図

【図10】図1とは異なる他の実施形態を説明するためのフローチャート

【図11】図10に示すフィルタリング処理による画像データの変化を示す図

【図12】フィルタリング済みの位相ラッピングされた位相像を示す図

【図13】アルミニウム合金等の材料を引張った場合における、従来のスペックル干渉法(ESPI)で観察した場合の変形量分布を示す図

【図14】本発明の実施形態方法の実験に用いられるアルミニウム合金の試験片

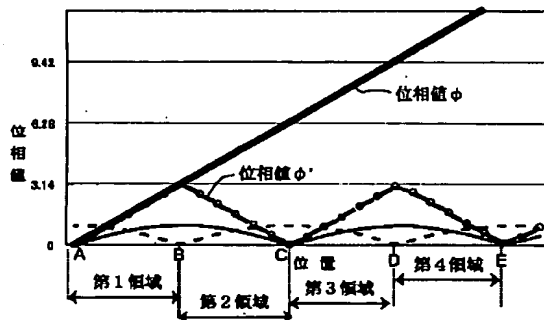
【図15】本発明の実施形態方法を適用して得られた、変形分布 $u$ の定量解析データを示す図

【図16】本発明の実施形態方法を適用して得られた、変形分布 $u$ の定量解析データを示す図

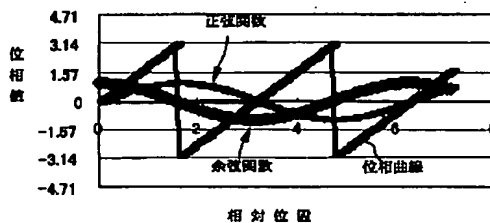
【符号の説明】

100	被観察体
101	レーザ光源
102A、102B	光束
103	CCD
104A、B	シャッター
201	平板
202	PZT

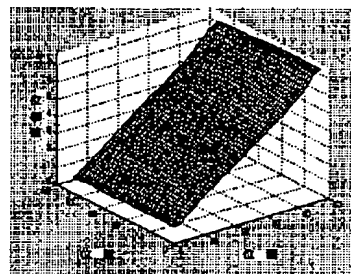
【図3】



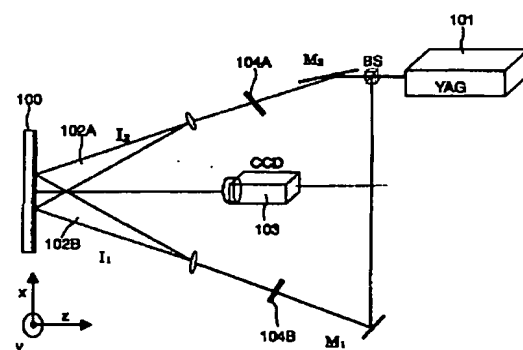
【図5】



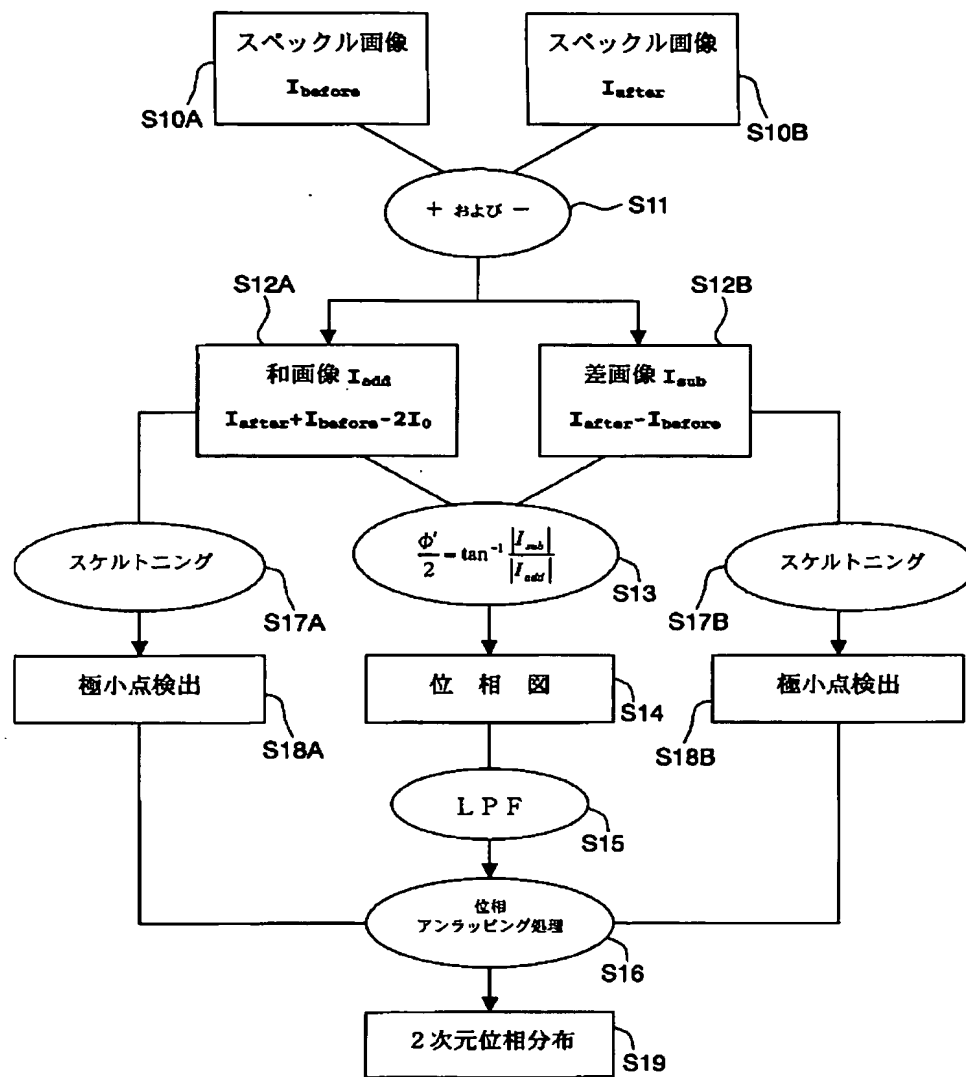
【図4】



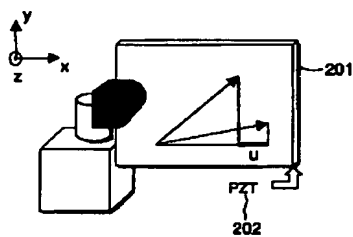
【図6】



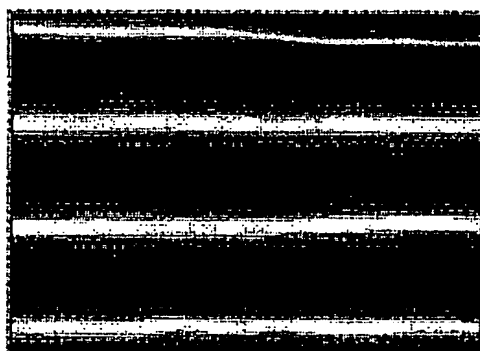
【図1】



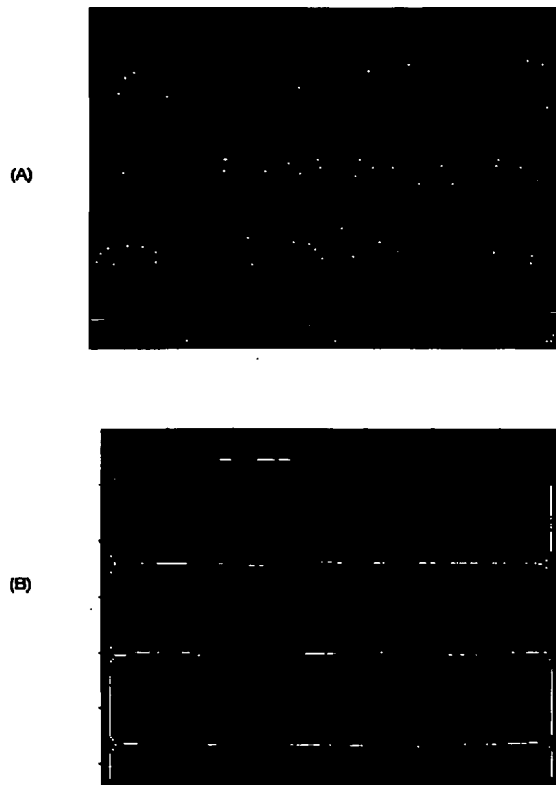
【図7】



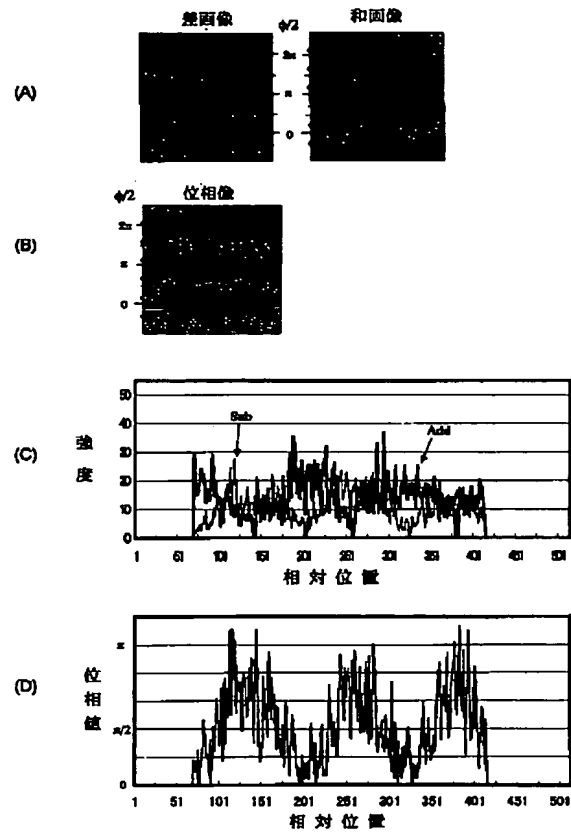
【図12】



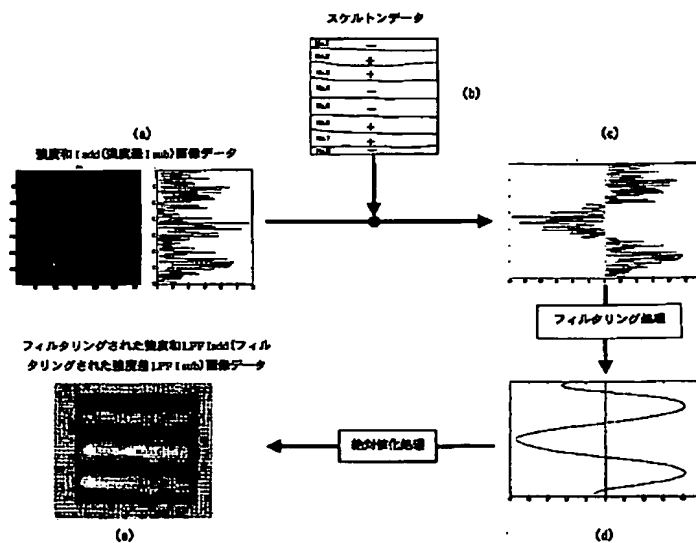
【図2】



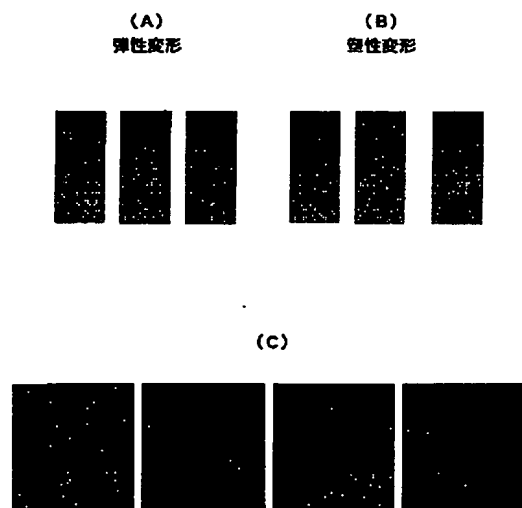
【図8】



【図11】

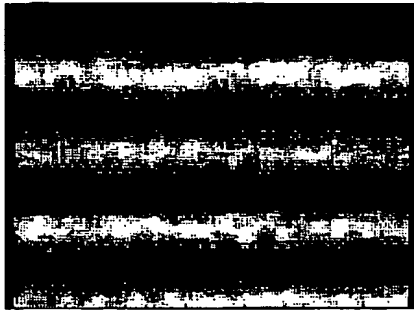


【図13】

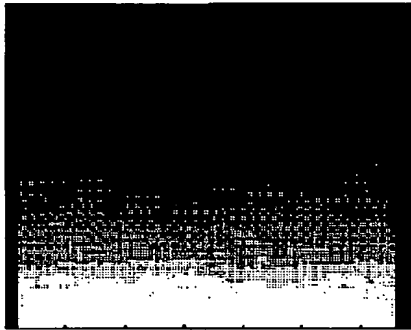


【図9】

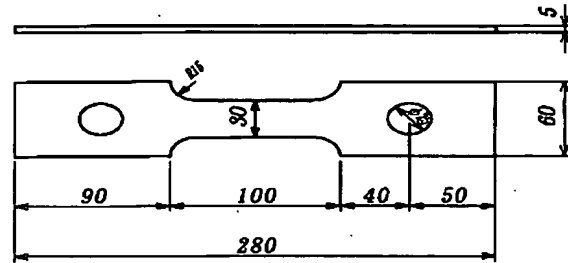
(A)



(B)

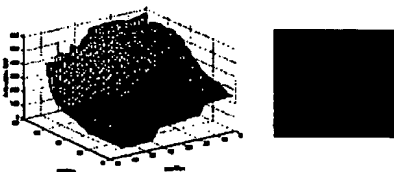


【図14】

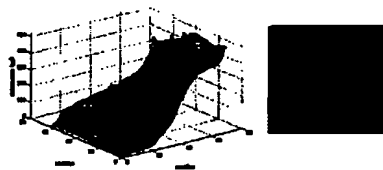


【図15】

(A) No. 1 (1.2 秒後)



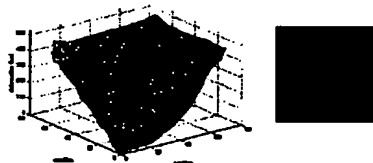
(B) No. 10 (12 秒後)



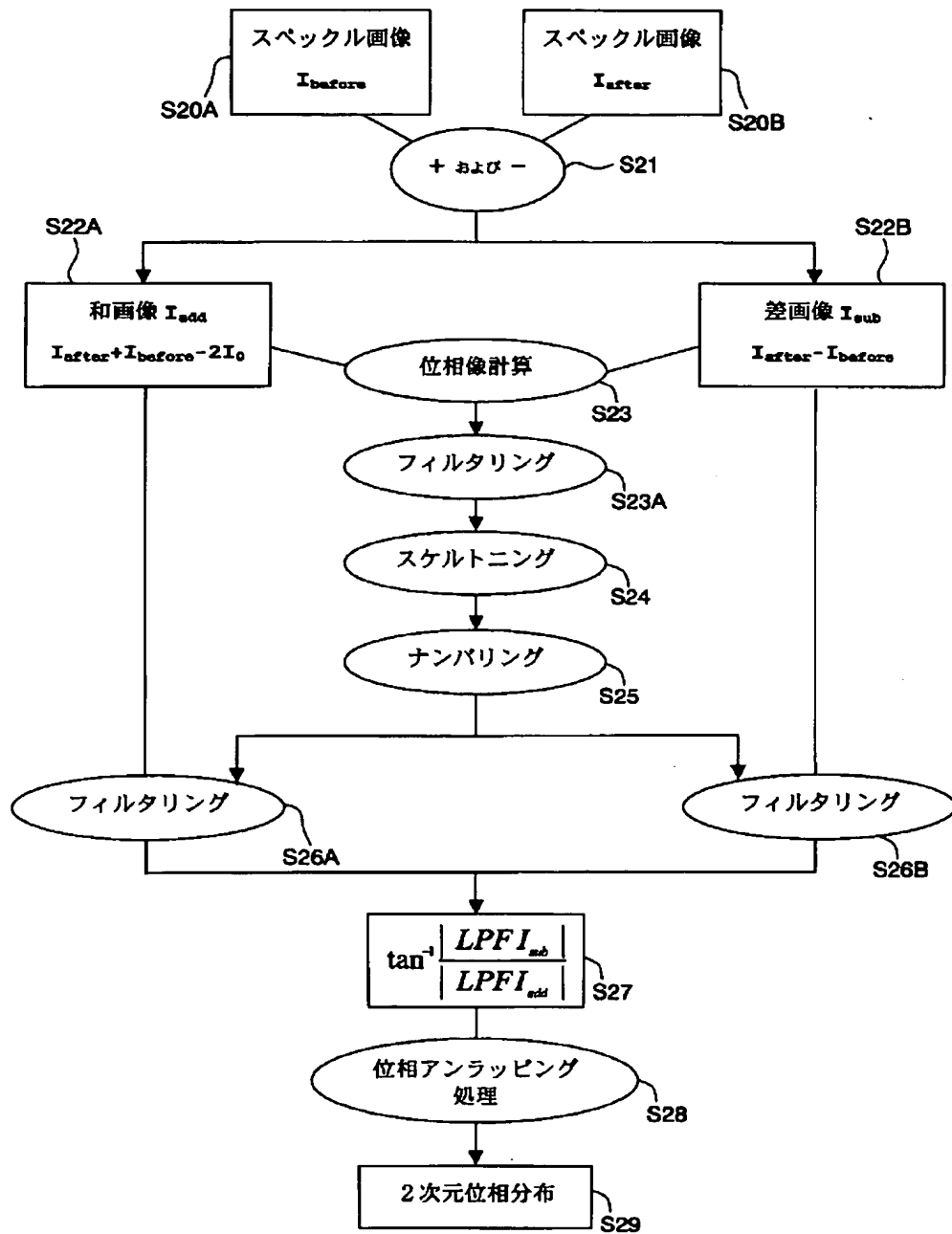
(C) No. 26 (31.2 秒後)



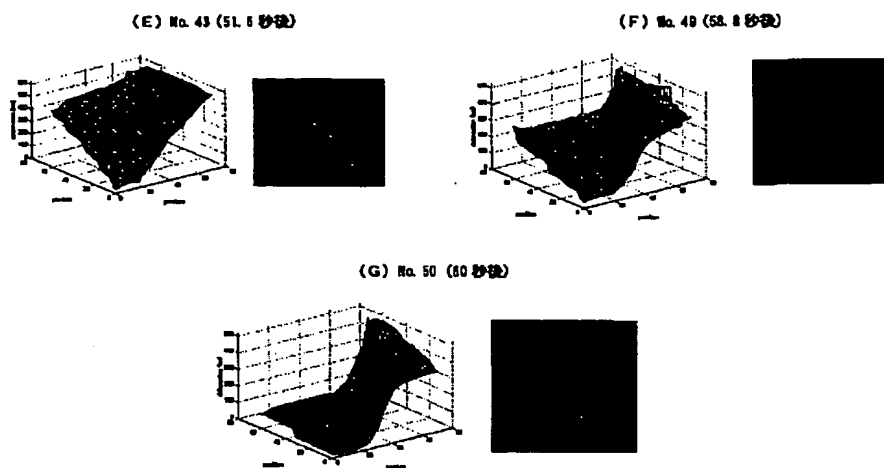
(D) No. 30 (36 秒後)



【図10】



【図16】



フロントページの続き

Fターム(参考) 2F065 AA65 BB13 CC00 DD04 FF56  
GG04 HH12 HH14 JJ03 JJ09  
JJ26 QQ00 QQ25 QQ26 QQ27  
QQ29 QQ31 QQ32 QQ33 SS00